



UNIVERSITÀ DEL SALENTO

DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E FISICA "ENNIO DE GIORGI"

TESI DI LAUREA TRIENNALE IN FISICA

Caratterizzazione degli Scintillatori per il Sistema di Test del Bersaglio Attivo del Rivelatore SAND dell'Esperimento DUNE

Relatore:

Chiar.mo Prof.
MARCO PANAREO

Correlatore:

Chiar.mo Dott.
ANTONIO SURDO

Laureando:

ALESSANDRO FRANCO

Anno Accademico 2025/2026

La natura ama nascondersi.

Eraclito

Sommario

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel quadro dell'esperimento DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) e tratta la caratterizzazione dei rivelatori a scintillazione destinati alla realizzazione del Cosmic Ray Tagger (CRT) che sarà utilizzato per valutare le funzionalità del modulo GRAIN del Near Detector dell'esperimento.

Nel primo capitolo al lettore viene introdotto il concetto di luminescenza, le tecnologie fotosensibili adoperate nei rivelatori a scintillazione (in particolare i Silicon PhotoMultiplier) e i parametri che caratterizzano tali rivelatori.

Nel secondo capitolo si discute l'attività sperimentale volta alla determinazione della lunghezza di attenuazione e dell'efficienza di alcune barrette di scintillatore che costituiranno il CRT, così come dell'effetto del wrapping sull'efficienza di trasmissione del segnale lungo la barretta.

Indice

Introduzione	6
DUNE	6
Obiettivi	7
Near Detector	9
SAND	10
GRAIN	11
Cosmic Ray Tagger (CRT)	12
1 Rivelatori a scintillazione	13
1.1 Materiali luminescenti	13
1.2 Rivelatori a scintillazione	14
1.3 Silicon PhotoMultiplier	15
1.4 Parametri	16
1.4.1 Lunghezza di attenuazione	17
1.4.2 Efficienza	18
2 Caratterizzazione delle barrette	19
2.1 Design del CRT	19

2.2	Set-up sperimentale	21
2.3	Barretta prototipo	24
2.4	Barretta 1	33
2.5	Barretta 2	36
2.6	Misure di efficienza	39
2.7	Confronto dei wrapping	44
3	Conclusioni	50

Elenco delle figure

1	Paesi che collaborano all'esperimento.	6
2	Struttura di DUNE.	7
3	Composizione del Near Detector.	10
4	Componenti di SAND.	11
1.1	Struttura di un rivelatore a scintillazione. [1]	14
2.1	Illustrazione dei piani costituiti da barrette scintillanti che com- pongono il CRT.	20
2.2	Immagine acquisita in laboratorio che ritrae l'apparato strumen- tale utilizzato per testare le barrette scintillanti.	21
2.3	Moduli NIM utilizzati in laboratorio.	23
2.4	Apparato sperimentale completo.	24
2.5	Simulazione del flusso di muoni.	26
2.6	Dati acquisiti sui 3 canali per il test della barretta prototipo, in corrispondenza di una distanza di 35 cm dall'estremo in cui è situato il SiPM.	28
2.7	Fit con distribuzione di Landau degli istogrammi di fig. 2.6.	29
2.8	Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta prototipo, CH00.	31

2.9	Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta di riferimento 1, CH01. . .	31
2.10	Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta di riferimento 2, CH02. . .	32
2.11	Dati acquisiti sui 3 canali per il test della barretta 1, in corrispondenza di una distanza di 35 cm dall'estremo in cui è situato il SiPM.	34
2.12	Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta 1, CH00.	35
2.13	Dati acquisiti sui 3 canali per il test della barretta 2, in corrispondenza di una distanza di 27 cm dall'estremo in cui è situato il SiPM.	36
2.14	Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta 2, CH00.	38
2.15	Dati acquisiti per la barretta prototipo nell'intervallo $ADC < 500$ per le varie distanze dal SiPM.	42
2.16	Dati acquisiti in diverse condizioni di wrapping ad una distanza di 35 cm dall'estremo della barretta in cui è situato il SiPM.	45
2.17	Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta W in assenza di wrapping.	46
2.18	Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta W con wrapping in mylar.	47
2.19	Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta W con wrapping in teflon.	47
2.20	Confronto dei fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta W nelle tre condizioni di wrapping prese in esame.	48

Elenco delle tabelle

2.1	CH00 - barretta prototipo	29
2.2	CH01 - barretta di riferimento 1	30
2.3	CH02 - barretta di riferimento 2	30
2.4	CH00 - barretta 1	35
2.5	CH00 - barretta 2	37
2.6	Efficienza di acquisizione per le diverse misure	41
2.7	Efficienza intrinseca - Barretta prototipo	43
2.8	Efficienza intrinseca - Barretta 1	43
2.9	Efficienza intrinseca - Barretta 2	44

Introduzione

DUNE

Il Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) sarà un osservatorio internazionale sulla fisica del neutrino e il decadimento dei nucleoni ospitato dal Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), Batavia, Illinois, USA. Si tratta di un esperimento globale che vede il coinvolgimento di circa 1400 collaboratori provenienti da 200 istituzioni scientifiche di 30 nazioni.

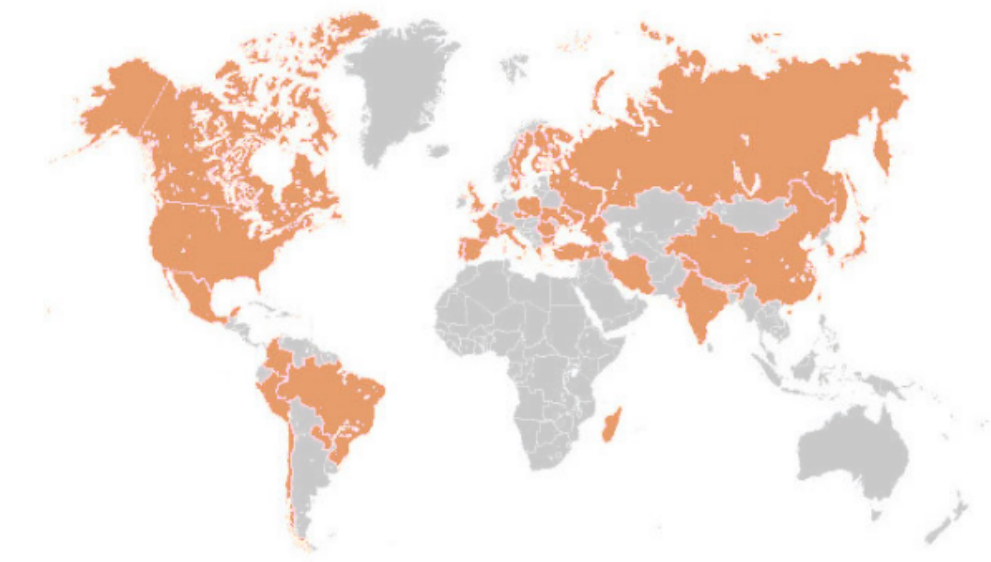


Figura 1: Paesi che collaborano all'esperimento.

Un fascio di neutrini o antineutrini, prevalentemente muonici, sarà generato presso il Fermilab. Le particelle che caratterizzano il fascio iniziale saranno rilevate da un sistema denominato Near Detector (ND), posto a 574 m di distanza dalla sorgente. I neutrini viaggeranno per 1300 km nel sottosuolo fino a raggiungere il Sanford Underground Research Facility (SURF), posto a 1.5 km di profondità in South Dakota, dove un secondo rilevatore denominato Far Detector (FD) acquisirà i dati sulla composizione del fascio. Entrambi i detector adopereranno la tecnologia LArTPC (Liquid Argon Temporal Projection Chamber) che garantirà una risoluzione senza precedenti nella ricostruzione degli eventi da interazioni dei neutrini.

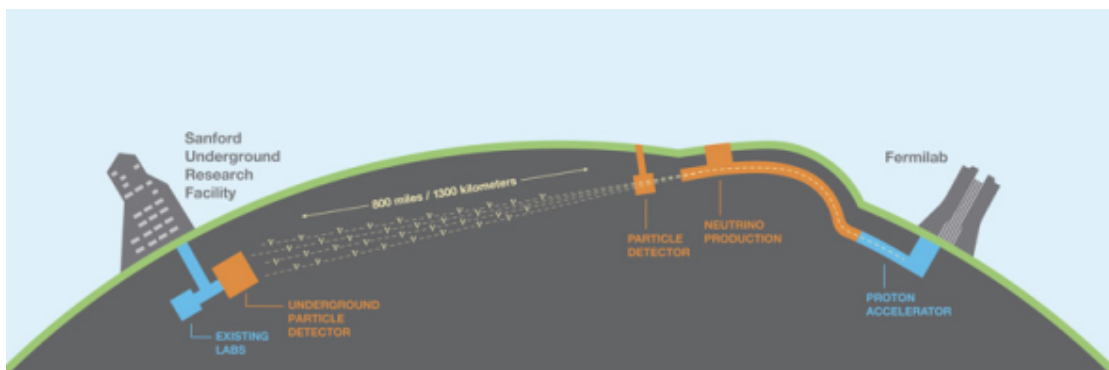


Figura 2: Struttura di DUNE.

Il Long Baseline Neutrino Facility (LBNF) ha la responsabilità della costruzione delle infrastrutture che ospiteranno il ND ed il FD e della strumentazione tecnica necessaria per la realizzazione del fascio.

Obiettivi

DUNE [2] si prefigge i seguenti obiettivi scientifici:

- Svolgere un programma completo di misurazioni delle oscillazioni dei neutrini utilizzando fasci ν_μ e $\bar{\nu}_\mu$ generati presso il Fermilab. Questo programma include misure della fase di CP δ_{CP} , la determinazione dell'ordinamento di massa dei neutrini, la misura dell'angolo di mixing θ_{23} , la determinazione dell'ottante in cui questo angolo giace e test sensibili del paradigma a tre neutrini.
- Lo studio del decadimento del protone.
- Rilevare e misurare il flusso di ν_e generato dal collasso gravitazionale stellare, se tale evento si verificasse durante la vita dell'esperimento.

A tali obiettivi principali viene associato un programma scientifico parallelo con i seguenti obiettivi secondari:

- Condurre misure su oscillazioni del flavour con un sensibilità per fenomeni oltre il modello standard.
- Misurare oscillazioni dei neutrini atmosferici.
- Ricerche sulla materia oscura.
- Un programma per la fisica delle interazioni del neutrino, in particolare misure della sezione d'urto e studio degli effetti nucleari.

Inoltre, il continuo miglioramento dei rivelatori in fase di costruzione consentirebbe di potenziare le capacità di osservare fenomeni a bassissima energia.

Near Detector

Il Near Detector [3] sarà composto da tre elementi, due mobili e uno fisso:

- **ND-LAr**, una camera a proiezione temporale ad argon liquido (LArTPC) che acquisirà dati sulla composizione iniziale del fascio restando per il 50% del tempo fuori dall'asse del fascio (off-axis);
- Nella prima fase dell'esperimento si adopererà uno spettrometro per muoni denominato **TMS (Temporary Muon Spectrometer)** che sarà successivamente sostituito da **ND-GAr**, una TPC ad argon gassoso. Lo scopo di questa componente è di caratterizzare le particelle secondarie generate dalle interazioni dei neutrini all'interno di ND-LAr che forniscono informazioni sullo spettro energetico dei neutrini stessi. Anche questa componente acquisisce dati off-axis per il 50% del tempo.
- **SAND (System for on-Axis Neutrino Detection)** è un ulteriore rivelatore che è posizionato permanentemente sull'asse del fascio di neutrini (on-axis) e ha lo scopo di monitorare costantemente intensità e flusso del fascio e possibili variazioni.

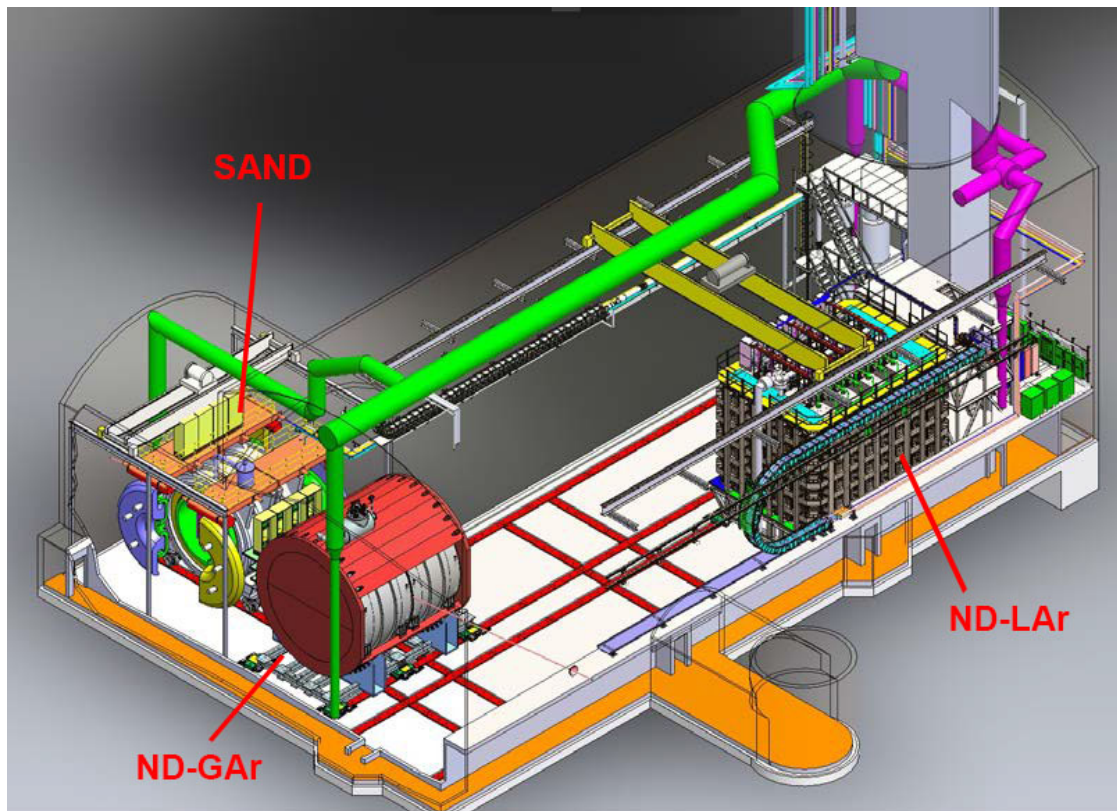


Figura 3: Composizione del Near Detector.

SAND

SAND [4] sarà composto da un magnete solenoidale superconduttore al cui interno sarà posizionato un calorimetro a piombo e fibre scintillanti (**Electromagnetic CALorimeter, ECAL**). All'interno dell'ECAL ci saranno un tracciatore (**Inner Tracker**) costituito da Straw Tubes o camere a deriva e un bersaglio attivo denominato **GRAIN (GRanular Argon for Interactions of Neutrinos)**.

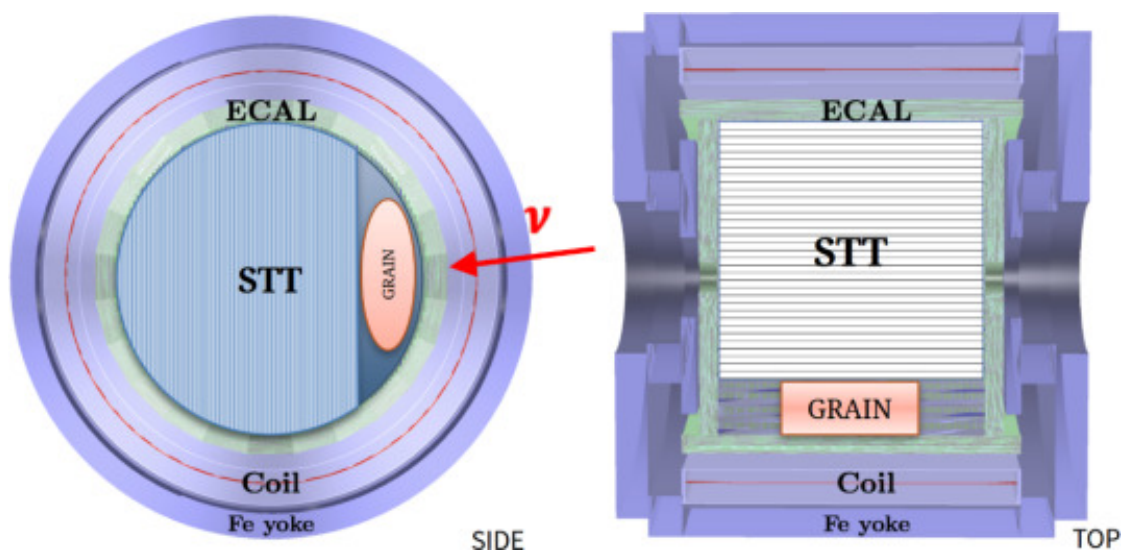


Figura 4: Componenti di SAND.

GRAIN

GRAIN è un rivelatore a forma di cilindro schiacciato, a sezione ellissoidale, costituito da un bersaglio attivo di 1 t di argon liquido racchiuso in un criostato. Quando un neutrino collide con i nuclei di argon all'interno di GRAIN si generano particelle cariche che eccitano gli atomi circostanti provocando l'emissione di luce di scintillazione VUV (128 nm). Delle matrici di SiPM (Silicon Photo-Multipliers) insieme a sistemi ottici sensibili alla luce VUV sono disposte sulle pareti per raccogliere la luce di scintillazione emessa. Questo sistema consente di ricostruire istantaneamente le tracce 3D, il punto di interazione e l'energia depositata dal neutrino.

Cosmic Ray Tagger (CRT)

Una stazione di test è in fase di allestimento al CERN per la validazione completa di un prototipo in scala 1:1 di GRAIN attualmente in fase di costruzione. La validazione del prototipo include, oltre agli aspetti di meccanica, di criogenia e di trasporto dei segnali di elettronica fuori dal criostato, anche l'acquisizione dati e la ricostruzione delle tracce generate nell'argon liquido. A questo scopo, presso la sezione INFN di Lecce, è stato progettato ed è ora in fase di realizzazione un tracciatore per muoni cosmici denominato CRT. Esso avrà la funzione di dare il via (trigger) all'acquisizione dei dati quando un muone dei raggi cosmici attraversa il volume sensibile del rivelatore e di fornire le informazioni geometriche sulla traccia. Questo consentirà di verificare la capacità di rivelazione e ricostruzione dell'evento a partire dai fotoni di scintillazione raccolti. Il CRT sarà costituito da quattro piani di scintillatore plastico, segmentati in barrette sottili e disposti ai due lati di GRAIN, due per parte.

Lo scopo di questa tesi consiste nell'analisi dell'efficienza e nella determinazione della lunghezza di attenuazione del segnale di luce delle barrette scintillanti che saranno utilizzate nel CRT. Viene inoltre valutato l'effetto dei diversi tipi di wrapping delle barrette sulla trasmissione del segnale luminoso.

Capitolo 1

Rivelatori a scintillazione

1.1 Materiali luminescenti

Il fenomeno per cui alcuni materiali assorbono dell'energia per riemetterla sotto forma di luce viene detto luminescenza [1]. Se l'emissione avviene entro $10^{-8}s$ il fenomeno prende il nome di fluorescenza, se il tempo impiegato è più lungo si parla di fosforescenza. Il tasso di emissione di fotoni per unità di tempo calcolato al tempo t può essere descritto in prima approssimazione dalla relazione:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right) \quad (1.1)$$

Dove N_0 è il numero totale di fotoni emessi nell'intero processo di scintillazione (tra $t = 0$ e $t = \infty$) e τ_d è il tempo di decadimento. La relazione precedente non è sempre soddisfatta, una relazione più generale è composta da due componenti esponenziali, una rapida e l'altra lenta che vengono denotate rispettivamente

con i pedici "f" (fast) e "s" (slow).

$$N = A \exp\left(\frac{-t}{\tau_f}\right) + B \exp\left(\frac{-t}{\tau_s}\right) \quad (1.2)$$

Generalmente il comportamento di questi materiali è tale che la componente fast sia predominante ed è possibile ricondursi all'equazione 1.1.

1.2 Rivelatori a scintillazione

Un rivelatore a scintillazione è costituito da un materiale luminescente che viene accoppiato ad un dispositivo che converte la luce in una corrente elettrica misurabile.

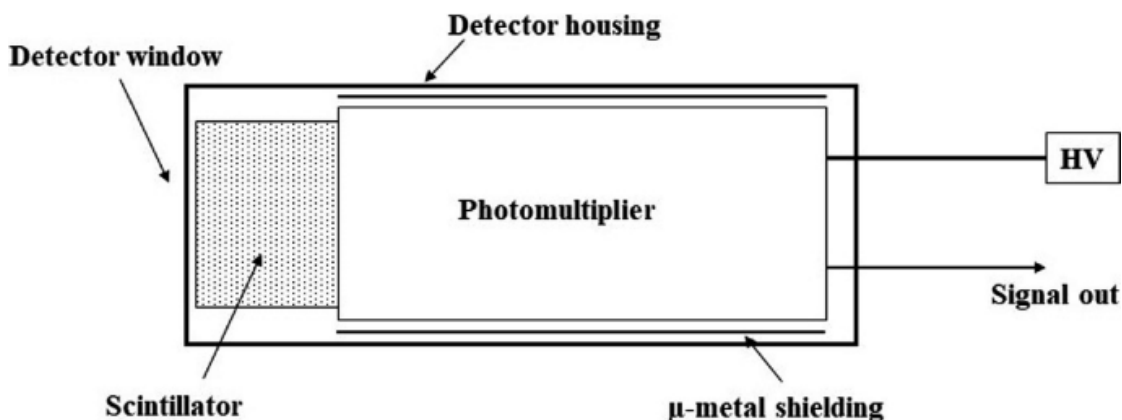


Figura 1.1: Struttura di un rivelatore a scintillazione. [1]

Tradizionalmente per convertire la luce di scintillazione in corrente elettrica si adoperano i tubi fotomoltiplicatori. Oggi esistono dispositivi a semiconduttore che permettono tale conversione con un'efficienza paragonabile a quella dei tubi fotomoltiplicatori e con un ingombro e una tensione di alimentazione minori.

Il problema principale di questi dispositivi è che la loro efficienza dipende fortemente dalla temperatura. Di dispositivi a semiconduttore che convertono la luce in una corrente misurabile ne esistono di diverse tipologie, di particolare interesse per questa tesi sono i **SiPM (Silicon PhotoMultiplier)**.

1.3 Silicon PhotoMultiplier

I SiPM fanno parte di una gamma di rivelatori a semiconduttore noti come **fotodiodi a valanga (Avalanche PhotoDiode o ADP)** [5]. In un fotodiodo il fotone incidente cede energia all'interno del materiale semiconduttore generando coppie elettrone-lacuna. Sotto l'azione di un campo elettrico generato da una coppia di elettrodi, uno positivo e l'altro negativo, queste cariche libere iniziano a migrare: le lacune migrano verso l'elettrodo negativo e gli elettroni verso l'elettrodo positivo. In un ADP il campo elettrico è sufficientemente intenso che gli elettroni generati dal fotone generano nuove coppie elettrone-lacuna, che a loro volta generano altre coppie. Questo effetto è detto effetto valanga. La tensione di alimentazione per questo tipo di dispositivi viene tenuta al di sotto della soglia di breakdown e deve essere stabile. Facendo operare un ADP in prossimità della tensione di breakdown le regioni di moltiplicazione dei vari fotoelettroni si fondono e si crea un'unica valanga. In questa condizione si dice che il fotodiodo opera in modalità Geiger ed anche un singolo fotone è capace di fornire un segnale elettrico rivelabile. Una matrice di piccoli ADP in modalità Geiger sensibili al singolo fotone, detti SPAD (Single Photon Avalanche photoDiodes), costituisce un SiPM. In generale le dimensioni di un singolo SPAD sono tali da renderlo sensibile al singolo fotone. Il numero di celle che produ-

cono una valanga è proporzionale al numero di fotoni di scintillazione incidenti. Un rivelatore a scintillazione produce migliaia di fotoni pertanto il numero di celle deve essere un multiplo grande del numero di fotoni raccolti. Le celle sono collegate in parallelo in modo che gli output delle singole celle si sommino e producano un impulso con ampiezza proporzionale al numero di fotoni rivelati. I SiPM generano un segnale di rumore dovuto prevalentemente a:

- **Motivi termici.** Gli SPAD possono produrre segnali dovuti alle coppie elettrone-lacuna che si originano per eccitazione termica nella banda di conduzione del silicio.
- **Afterpulsing.** Questo fenomeno si verifica quando le impurità nel reticolo di silicio agiscono come trappole che si diseccitano in modo esponenziale nel tempo. Gli elettroni provenienti da queste trappole diseccitate possono causare valanghe successive all'interno della stessa cella e aumentare il numero di valanghe per ogni fotone di scintillazione.
- **Diafonia ottica.** Gli elettroni generati in una valanga all'interno di uno SPAD possono indurre l'emissione di fotoni. Questi ultimi, interagendo con una cella vicina, inducono un impulso di valanga che non è correlato alla luce incidente originale.

1.4 Parametri

Alcuni parametri caratterizzano i rivelatori a scintillazione.

1.4.1 Lunghezza di attenuazione

La luce generata all'interno di un materiale luminescente si può perdere per due motivazioni: essa può uscire dai confini del materiale oppure essere assorbita dal materiale stesso. Per rivelatori di piccole dimensioni il secondo effetto è trascurabile. Solo quando le dimensioni del rivelatore sono prossime alla lunghezza di attenuazione questo effetto diventa non trascurabile. Si definisce lunghezza di attenuazione la lunghezza dopo la quale l'intensità luminosa si riduce di un fattore $\frac{1}{e}$. L'intensità luminosa come funzione della lunghezza è descritta dalla seguente equazione:

$$L(x) = L_0 \exp\left(\frac{-x}{l}\right) \quad (1.3)$$

dove l è la lunghezza di attenuazione, x la distanza percorsa dalla luce e L_0 l'intensità luminosa iniziale. Solitamente la lunghezza di attenuazione per uno scintillatore plastico è dell'ordine di $\approx 1m$ [5], pertanto questo effetto diventa rilevante in rivelatori di grandi dimensioni.

L'effetto che maggiormente riduce l'efficienza di un rivelatore a scintillazione è la perdita di luce attraverso i bordi del materiale. La luce emessa in un punto qualsiasi all'interno del materiale si propaga in tutte le direzioni e solo una parte di essa raggiunge il sensore, la parte restante viaggia verso i bordi del materiale dove, a seconda dell'angolo di incidenza, possono accadere due cose. Se la direzione della luce incidente forma un angolo rispetto alla normale alla superficie del bordo del materiale più grande dell'angolo di Brewster:

$$\theta_B = \sin^{-1}\left(\frac{n_{out}}{n_{scint}}\right) \quad (1.4)$$

dove n_{scint} è l'indice di rifrazione del materiale luminescente e n_{out} quello del mezzo che lo circonda, si ha riflessione totale interna quindi la luce viene riflessa verso l'interno del materiale. Ad angoli inferiori rispetto a quello di Brewster si ha una riflessione parziale e parte della luce viene trasmessa all'esterno del materiale. Per ovviare a questo problema solitamente è d'uso avvolgere lo scintillatore in un materiale riflettente (wrapping) in modo che la luce persa venga riflessa e trasmessa nuovamente all'interno del materiale scintillante.

1.4.2 Efficienza

Si definisce efficienza di un rivelatore a scintillazione il rapporto tra il numero di eventi con ampiezza del segnale sopra una certa soglia di discriminazione, quindi conteggiati, e il numero totale di particelle cariche che colpiscono il volume del rivelatore.

$$\epsilon = \frac{n_{conteggiati}}{n_{totale}} \quad (1.5)$$

Come si descriverà più avanti, diversi fattori concorrono a determinare il valore dell'efficienza.

Capitolo 2

Caratterizzazione delle barrette

2.1 Design del CRT

Un prototipo in scala 1:1 di GRAIN sarà installato e studiato presso il CERN di Ginevra, al fine di validare tutte le sue caratteristiche. Per valutarne le funzionalità si adopererà un Cosmic Ray Tagger che fornirà il segnale di trigger per la lettura di un sistema di imaging e permetterà il tracciamento dei muoni di origine cosmica che attraversano il rivelatore (si veda la figura [2.1](#)). Il segnale di trigger per muoni sarà dato dalla coincidenza di quattro piani di scintillatori plastici, una coppia per ciascun lato. Ogni piano, delle dimensioni di 70 cm x 70 cm, sarà costituito da 32 barrette scintillanti di 2 cm x 1 cm x 70 cm racchiuse in un vassoio di materiale plastico nero realizzato con stampante 3D, che garantisce la schermatura completa delle barrette dalla luce esterna. Le barrette sono fatte di materiale organico plastico scintillante (poliviniltoluene) con estremità sagomata a guida di luce. Ogni barretta è avvolta (wrapping) in uno strato di teflon bianco (P.T.F.E) in modo da aumentare la riflessione dei fotoni all'interno

della barretta e la raccolta da parte del sensore ottico. Un wrapping alternativo consiste in una pellicola di mylar (BoPET), un materiale leggero e riflettente. Il sensore ottico è un SiPM quadrato (Hamamatsu S14160-6050HS costituito da 14331 pixels con passo da $50\text{ }\mu\text{m}$) [6] di lato 6 mm accoppiato con l'estremità della barretta sagomata in modo da svolgere la funzione di guida di luce mediante un opportuno gel trasparente. Viene dunque acquisito un solo segnale di conversione di luce in carica elettrica da ciascuna barretta scintillante, per un totale di 128 canali di lettura ("read-out"). I 128 canali di read-out provenienti dalle barrette scintillanti saranno processati da 2 schede di acquisizione CAEN-DT5202 [7] a 64 canali ciascuna, ogni qualvolta si realizzerà una coincidenza tra i 4 piani del CRT in una finestra temporale di 120 ns. Tale coincidenza è solitamente causata dal passaggio di un muone attraverso i 4 piani del CRT e quindi attraverso il rivelatore posto nel mezzo.

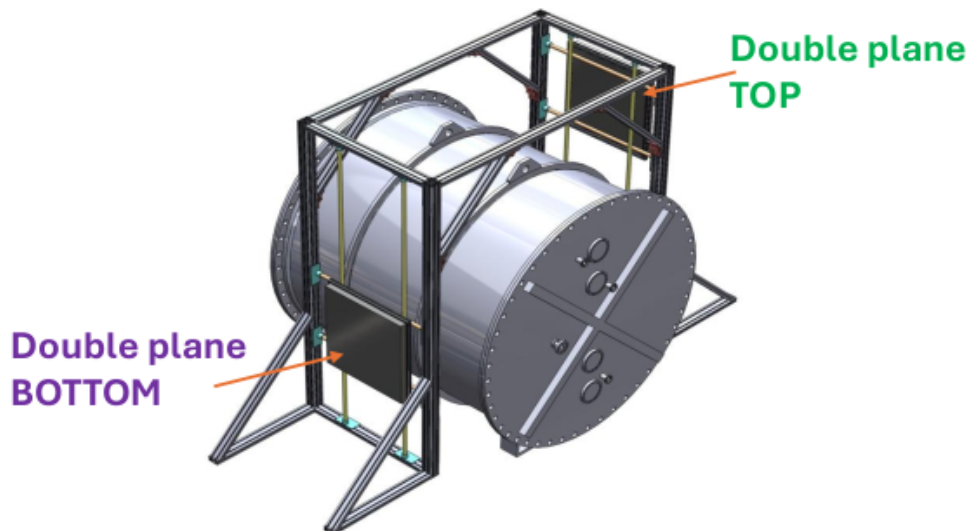


Figura 2.1: Illustrazione dei piani costituiti da barrette scintillanti che compongono il CRT.

Per questo lavoro di tesi è stata studiata la risposta in termini di ampiezza del segnale e di efficienza da parte di una barretta confezionata in laboratorio ("barretta prototipo"). Questa è stata poi confrontata con quella di 2 barrette lavorate da una ditta esterna specializzata che fornirà tutte le barrette richieste dal CRT. Su di una terza barretta sono stati poi confrontati i risultati ottenuti in diverse condizioni di wrapping.

2.2 Set-up sperimentale

Nell'immagine seguente è possibile osservare l'apparato strumentale che è stato utilizzato per le misure.

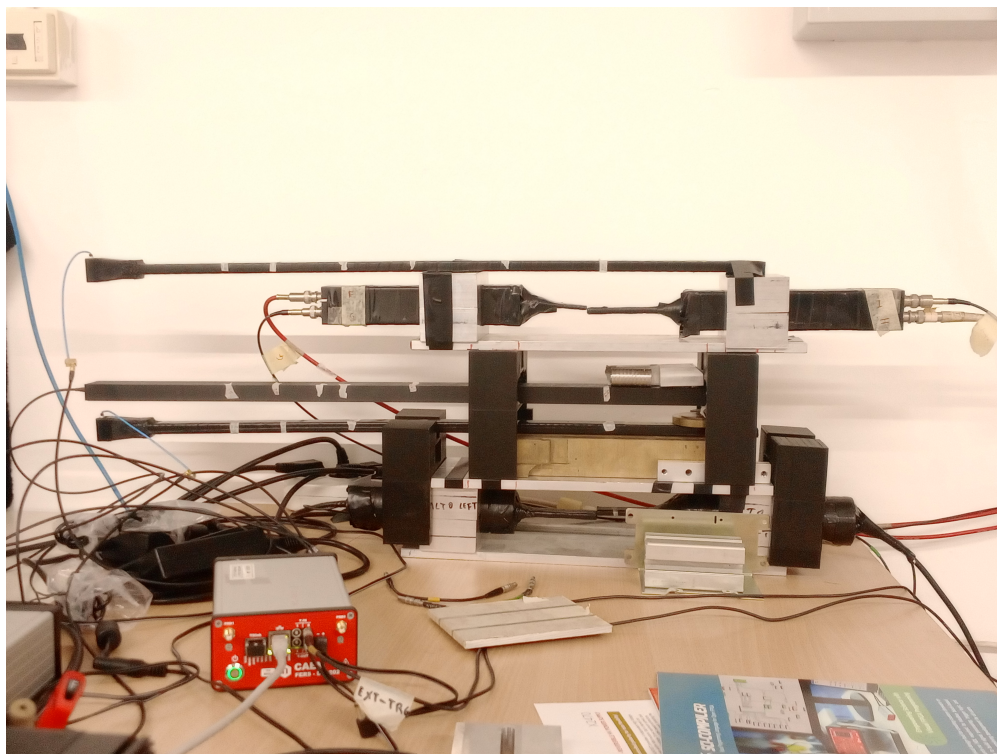


Figura 2.2: Immagine acquisita in laboratorio che ritrae l'apparato strumentale utilizzato per testare le barrette scintillanti.

La struttura di sostegno è stata realizzata presso l' Officina meccanica del Dipartimento. Le misure sono state fatte su delle barrette scintillanti dello stesso materiale plastico, ma confezionate con modalità differenti. La barretta posta all'estremità superiore della struttura è collegata al canale 1 (ch01) del sistema di acquisizione (CAEN FERS-DT5202). Essa è avvolta in uno strato di mylar alluminato (wrapping) su cui è stato avvolto uno strato di teflon al fine di fissare il mylar. Per schermare la barretta dalla luce esterna si è utilizzato del nastro isolante nero. La barretta in posizione centrale, collegata al canale 0 (ch00) del sistema di acquisizione, è avvolta in uno strato di teflon ed è racchiusa in un involucro di plastica nero realizzato con stampante 3D per simulare le condizioni delle barrette che costituiranno i piani del CRT. La barretta posta all'estremità inferiore, collegata al canale 2 (ch02) del sistema di acquisizione, è anch'essa avvolta in uno strato di teflon ed è schermata dalla luce con del nastro isolante nero. Questa differenza tra i wrapping è volta a comprendere se la qualità dell'acquisizione dei segnali da parte delle barrette è migliore con un tipo di wrapping rispetto all'altro. Uno studio specifico di questo aspetto è stato poi effettuato confrontando le misure eseguite sulla stessa barretta in diverse condizioni di wrapping. Quattro barrette scintillanti sottili di 7 cm di lunghezza e 2 cm di larghezza, denominate "finger" e lette mediante tubi fotomoltiplicatori classici, sono allineate alle barrette oggetto dello studio. I finger sono avvolti in mylar alluminato e nastro isolante nero e sono posti in coppie, una coppia situata nella parte superiore della struttura di sostegno tra la barretta collegata al canale 1 e quella collegata al canale 0 e la seconda coppia posta all'estremo inferiore della struttura. I due finger che costituiscono una coppia si toccano da un estremo e sono collegati elettronicamente tra loro in logica OR. In questo

modo basta che uno dei due finger sia attraversato da un muone perché la coppia generi un segnale. Per eseguire le funzioni logiche sui segnali si è deciso di utilizzare dei moduli NIM (Nuclear Instrumentation Module) che è possibile vedere nell'immagine in Figura 2.3.

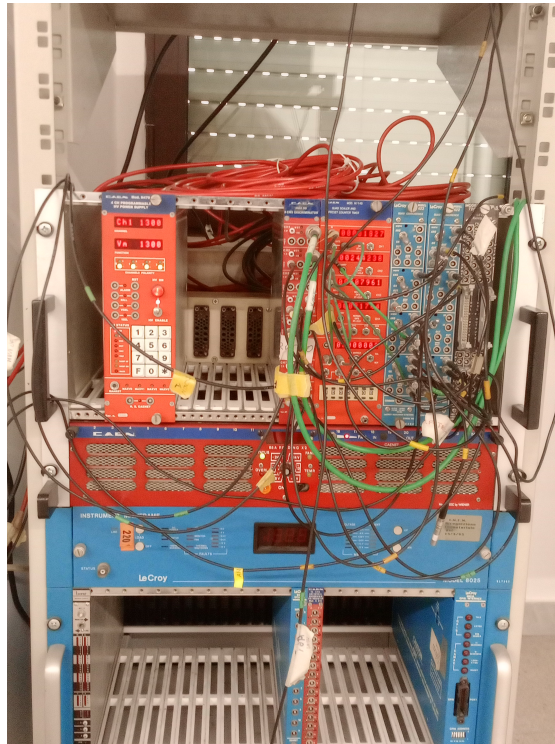


Figura 2.3: Moduli NIM utilizzati in laboratorio.

Le due coppie di finger, distanti tra loro 22 cm, sono collegate in logica AND e svolgono la funzione di trigger esterno. L'acquisizione dei segnali delle barrette di test ha luogo quando il segnale prodotto dall'attraversamento di una particella carica in una qualsiasi delle barrette di test (self-trigger) venga validato dal trigger esterno, ovvero risulti in coincidenza temporale con esso in una finestra di circa 120 ns.

Il conteggio dei trigger avviene separatamente dagli eventi acquisiti, ovvero

quelli in cui si è realizzata la coincidenza temporale tra self-trigger e trigger esterno, mediante un apposito modulo di elettronica ("scaler"). È dunque possibile valutare l'efficienza di risposta delle barrette di test adoperando la relazione (1.5), dove con $n_{conteggiati}$ si denota il numero di eventi acquisiti e con n_{totale} il numero di trigger esterni.

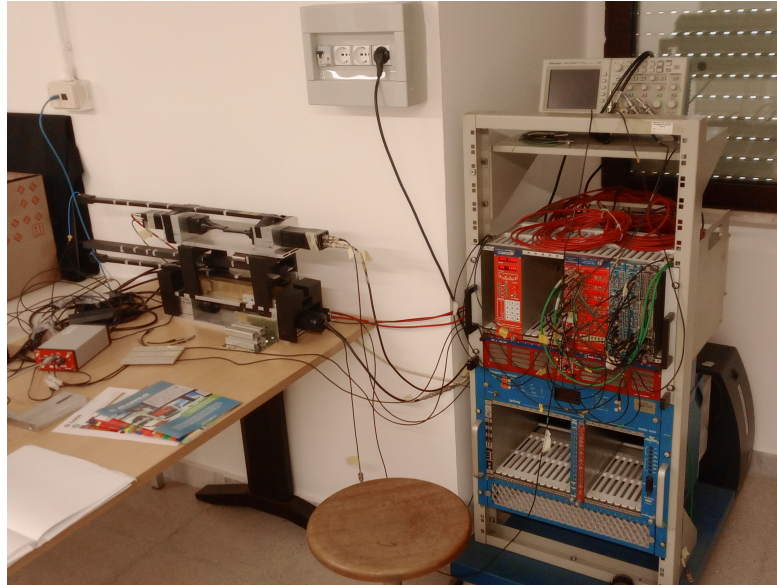


Figura 2.4: Apparato sperimentale completo.

La barretta oggetto di test è quella collegata al canale 0, le altre due sono prototipi realizzati nell'Officina meccanica del Dipartimento e servono per avere un riferimento. In figura 2.4 è riportata una foto dell'apparato sperimentale completo.

2.3 Barretta prototipo

L'apparato utilizzato (Fig. 2.4) acquisisce i segnali in due modalità: high gain (alto guadagno) e low gain (basso guadagno).

In modalità high gain il dispositivo amplifica fortemente il segnale. Questa modalità è ideale per particelle che rilasciano poca energia all'interno del rivelatore. Se l'energia rilasciata all'interno è alta, in questa modalità può accadere facilmente che il segnale emesso vada in saturazione. Per energie più alte si utilizza, solitamente, la modalità low gain che amplifica di poco il segnale. I dati analizzati in questa tesi sono stati acquisiti in modalità high gain.

La prima barretta oggetto di studio è un prototipo che è stato tagliato nell'Officina meccanica del Dipartimento da una lastra di materiale plastico scintillante. Per determinare la lunghezza di attenuazione delle barrette si è considerata la posizione di interazione delle particelle (muoni cosmici) lungo le barrette data dalla distanza tra la regione di coincidenza individuata dai fingers e l'estremità della barretta accoppiata ai SiPM. Sono state effettuate misure per 20 cm, 35 cm, 45 cm, 55 cm di distanza dal SiPM.

Allo scopo di associare un'incertezza alla posizione del passaggio del muone attraverso i finger, quindi attraverso le barrette, è stata effettuata una semplice simulazione Monte Carlo, basata sulla geometria del setup sperimentale, come descritto di seguito. La distribuzione angolare dei muoni cosmici a livello del mare è del tipo $\cos^2(\theta)$ dove con θ si indica l'angolo di zenit, ovvero l'angolo formato tra la normale alla superficie del luogo su cui viene presa la misura e la traiettoria del muone cosmico. In azimuth invece la distribuzione risulta piatta. Sono stati quindi simulati 100.000 muoni (ovvero tracce singole) secondo la distribuzione suddetta, incidenti in modo casuale sulla superficie dei 2 finger superiori, di lunghezza complessiva pari a 14 cm e larghezza pari a 2 cm. Sono stati quindi selezionati i muoni tali da intercettare geometricamente anche i 2 finger inferiori, distanti 22 cm da quelli superiori. Tali muoni sono responsabili

dell'attivazione del trigger esterno e attraversano la barretta oggetto di test. Essi hanno un punto di impatto lungo x , la coordinata longitudinale lungo i finger, a metà altezza tra le due coppie di finger (pertanto indicato con x -medio), dato dalla distribuzione della figura 2.5. Questa distribuzione in x ha una forma a campana e, fittandola con una gaussiana, risulta avere una sigma di 2.9 cm. Pertanto è stato deciso che un'incertezza di tipo statistico da associare alle misure di distanza pari a 3 cm possa ritenersi accettabile.

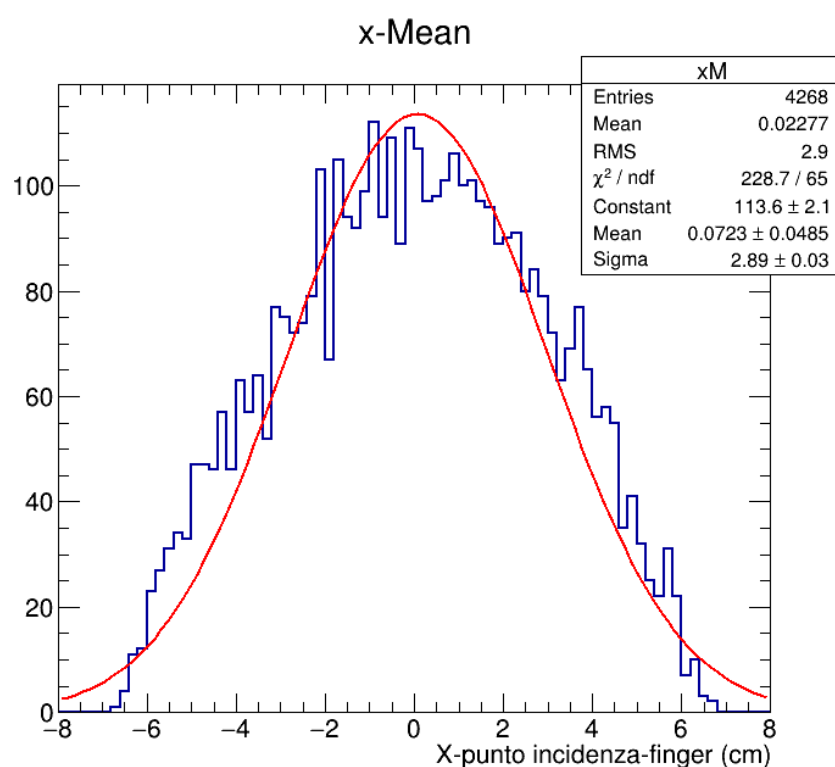


Figura 2.5: Simulazione del flusso di muoni.

I fotoni generati all'interno della barretta, una volta arrivati ai SiPM, producono un segnale di carica. Quest'ultimo viene amplificato ed il circuito di "peak sensing" del modulo CAEN FERS DT-5202 determina il valore di picco del segnale

ed un convertitore analogico-digitale (ADC) interno al modulo lo converte in un numero intero [7], identificato come "valore di ADC". Il valore di ADC è proporzionale alla carica che si genera all'interno dei SiPM, quindi all'energia rilasciata dai muoni nel materiale scintillante. Con i dati acquisiti sono stati realizzati degli istogrammi in cui sull'asse delle ascisse è indicato il valore di ADC (Analog to Digital Converter) mentre sulle ordinate il numero di eventi.

La scheda di acquisizione registra i dati da tutti i canali di elettronica collegati, anche se non vi è stato il passaggio di particelle nelle barrette e quindi la generazione di un segnale sopra la soglia di discriminazione. In questo caso, i valori di ADC letti costituiscono il cosiddetto piedistallo di misura, che è stato rimosso dagli istogrammi di fig. 2.6 e 2.7. Gli istogrammi di colore rosso sono relativi alla barretta collegata al canale 0, con il colore blu si indica la barretta collegata al canale 1 (barretta di riferimento 1) e con il colore verde quella collegata al canale 2 (barretta di riferimento 2). Di seguito sono riportati gli istogrammi relativi alla distanza di 35 cm dal SiPM per le tre barrette in acquisizione.

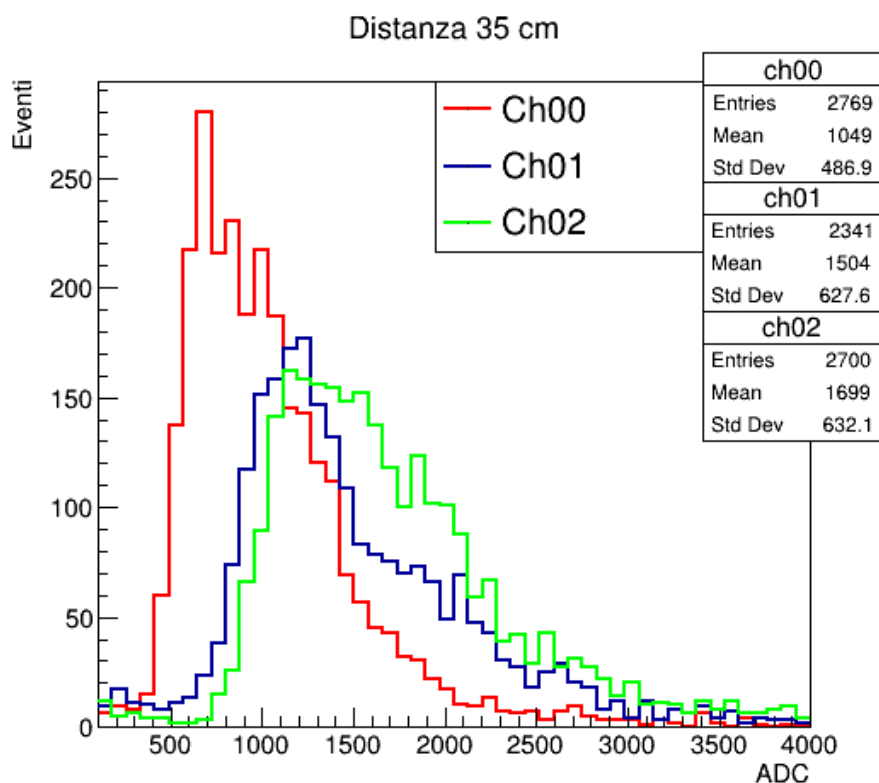


Figura 2.6: Dati acquisiti sui 3 canali per il test della barretta prototipo, in corrispondenza di una distanza di 35 cm dall'estremo in cui è situato il SiPM.

Gli istogrammi sono stati fittati secondo una distribuzione di Landau, come mostrato in Fig. 2.7, utilizzando il "fit panel" integrato dell'applicativo ROOT.

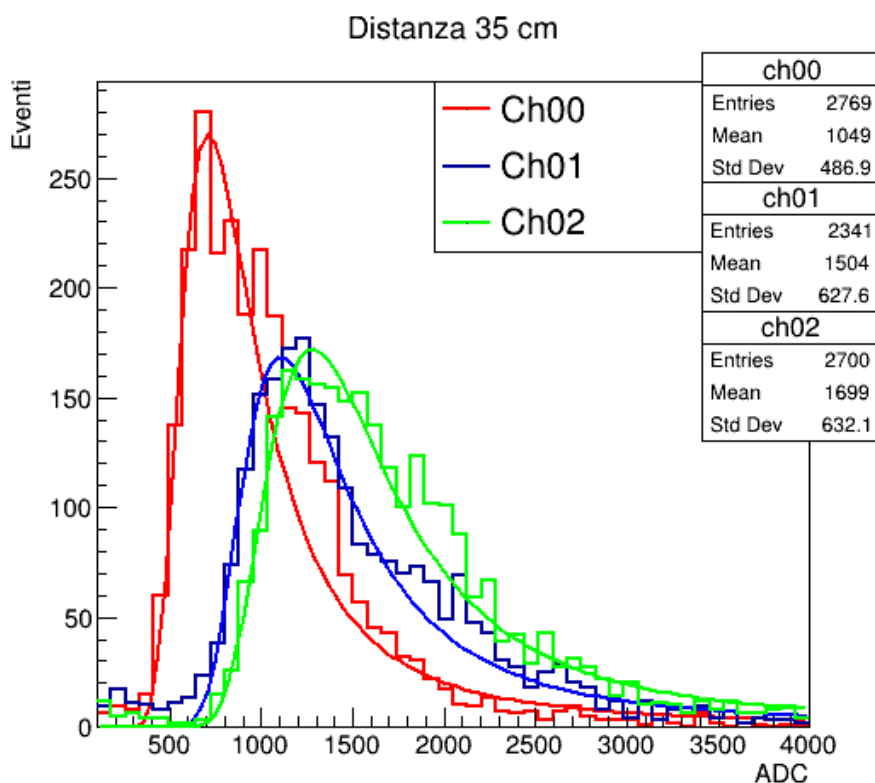


Figura 2.7: Fit con distribuzione di Landau degli istogrammi di fig. 2.6.

Dai fit realizzati sono stati ricavati il valore di MPV (Most Probable Value) dei conteggi di ADC e il relativo errore per ogni distanza. Nella seguente tabella sono riportati i valori ottenuti dai fit per ognuna delle distanze considerate.

Tabella 2.1: CH00 - barretta prototipo

x [cm]	Δx [cm]	MPV	ΔMPV
20	3	1602	16
35	3	740	6
45	3	325	3
55	3	213	2

Tabella 2.2: CH01 - barretta di riferimento 1

x [cm]	Δx [cm]	MPV	ΔMPV
20	3	2172	17
35	3	1149	9
45	3	656	5
55	3	484	4

Tabella 2.3: CH02 - barretta di riferimento 2

x [cm]	Δx [cm]	MPV	ΔMPV
20	3	2544	33
35	3	1328	10
45	3	850	6
55	3	663	4

Dei dati delle tabelle [2.1](#), [2.2](#), [2.3](#) è stato fatto il fit facendo uso della relazione ([1.3](#)), essendo x la distanza tra il punto di attraversamento dei muoni (quindi il punto di produzione della luce di scintillazione) ed il SiPM, e l'MPV di ADC una misura dell'intensità di luce raccolta.

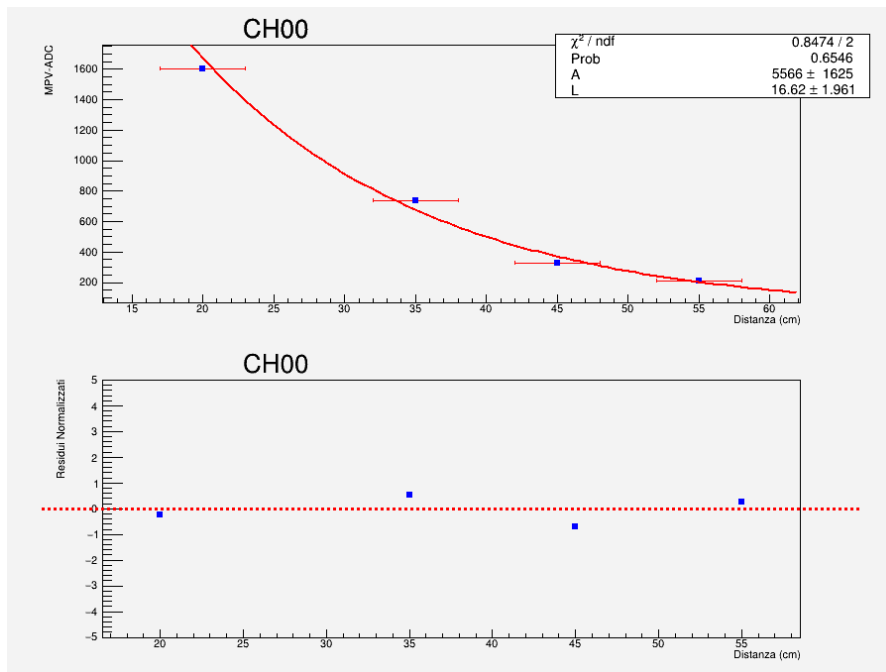


Figura 2.8: Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta prototipo, CH00.

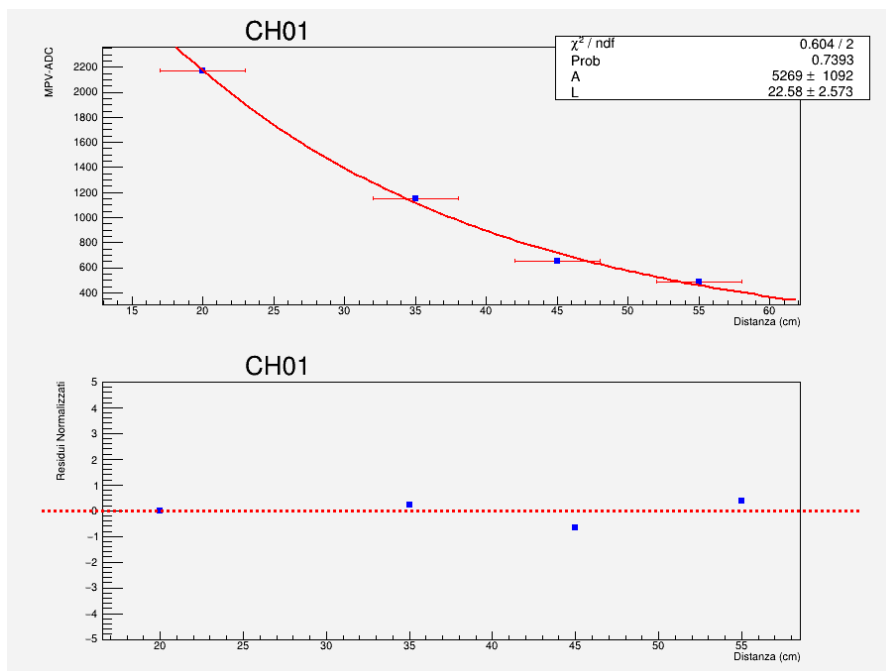


Figura 2.9: Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta di riferimento 1, CH01.

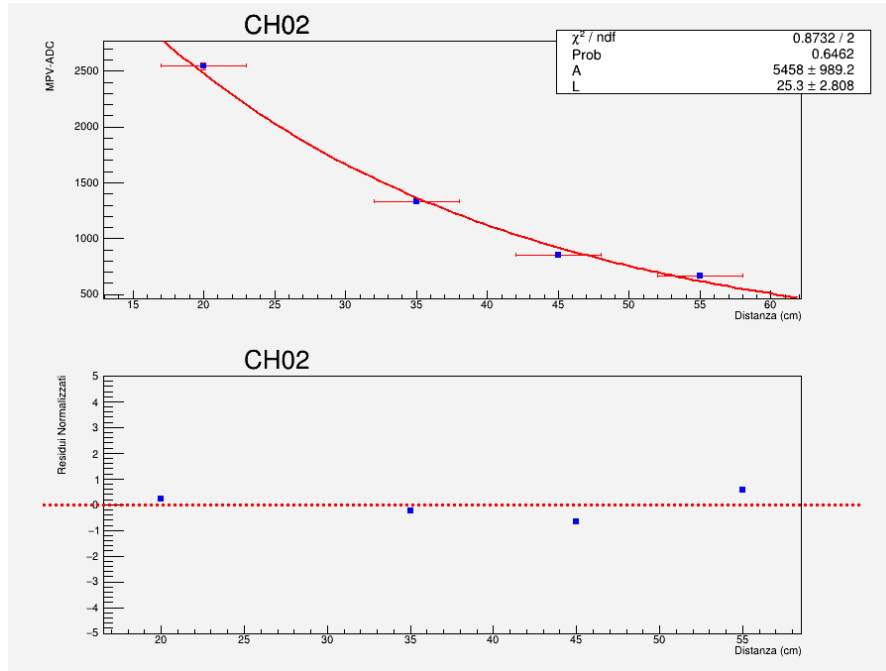


Figura 2.10: Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta di riferimento 2, CH02.

Le lunghezze di attenuazione determinate attraverso i fit delle figure precedenti sono riportate di seguito:

$$L_{prototipo} = (16.62 \pm 1.96) \text{ cm} \quad (2.1)$$

$$L_{CH01} = (22.58 \pm 2.57) \text{ cm} \quad (2.2)$$

$$L_{CH02} = (25.3 \pm 2.8) \text{ cm} \quad (2.3)$$

La minore lunghezza di attenuazione della barretta prototipo rispetto alle altre implica che i fotoni generati da un muone passante all'estremità opposta rispetto alla posizione del SiPM saranno fortemente attenuati. Questo è possibile dedurlo osservando gli istogrammi dell'immagine 2.6, infatti l'istogramma relativo al ch00 evidenzia uno spostamento della distribuzione verso valori di ADC

inferiori rispetto ai canali 1 e 2, pertanto è evidente che le barrette collegate ai canali 1 e 2 presentino una lunghezza di attenuazione maggiore. Le differenze osservate possono essere dovute sia alla qualità del materiale scintillante, sia alla lavorazione ed al confezionamento delle diverse barrette (wrapping, accoppiamento col SiPM, ecc...).

Applicando le stesse metodologie descritte per le misure sulla barretta prototipo si è determinata la lunghezza di attenuazione e l'efficienza di due barrette scintillanti, che saranno indicate con i nomi "barretta 1" e "barretta 2", di materiale BC-408 prodotte dalla ditta specializzata incaricata. Esse saranno utilizzate nella realizzazione del CRT.

2.4 Barretta 1

Ai canali 1 e 2 sono rimaste collegate le stesse barrette della misura precedente, al canale 0 invece è stata collegata la nuova barretta. Per questa barretta e la successiva si è deciso di acquisire dati alla distanza aggiuntiva di 27 cm.

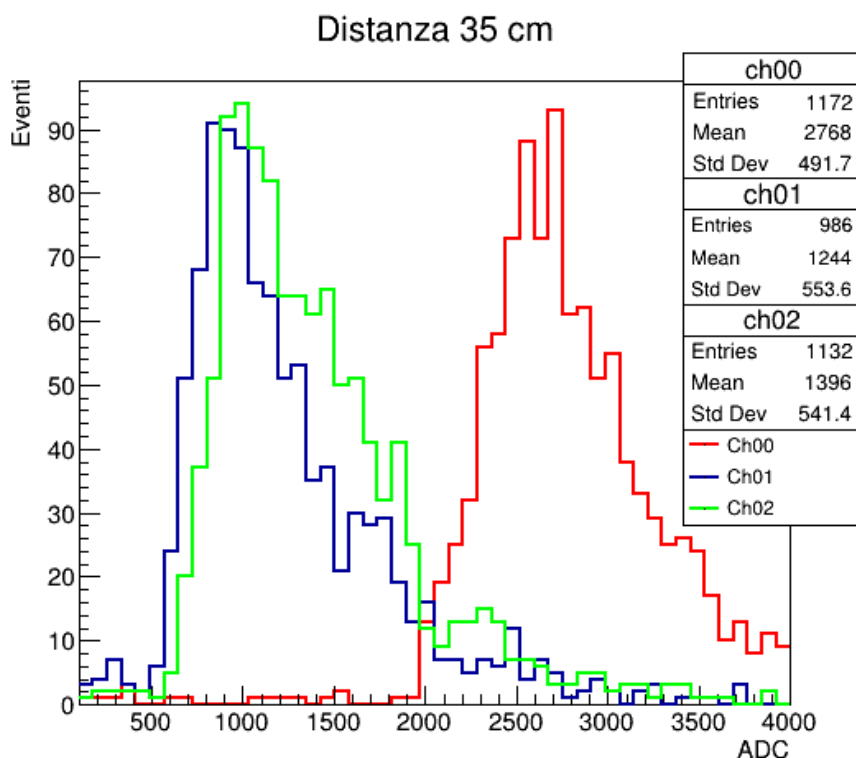


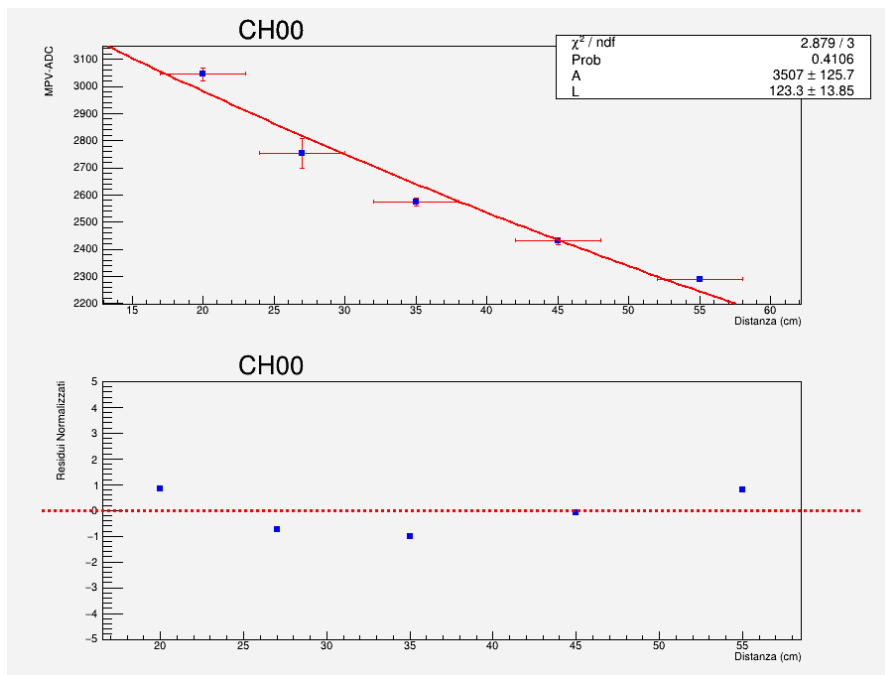
Figura 2.11: Dati acquisiti sui 3 canali per il test della barretta 1, in corrispondenza di una distanza di 35 cm dall'estremo in cui è situato il SiPM.

Lo schema colori degli istogrammi è lo stesso, cioè gli istogrammi di colore rosso sono relativi alla barretta il cui segnale è acquisito al canale 0 (barretta 1), con i colori blu e verde le barrette acquisite rispettivamente ai canali 1 e 2 (barrette di riferimento). In questo caso è possibile notare che l'istogramma associato al canale 0 è su valori di ADC più alti rispetto agli istogrammi associati ai canali 1 e 2, il che lascia supporre che la barretta oggetto di studio abbia una lunghezza di attenuazione maggiore. Nella Tabella 2.4 sono riportati i valori ottenuti dai fit del segnale di ADC con una funzione di Landau, per ognuna delle distanze considerate, nel test della barretta 1.

Tabella 2.4: CH00 - barretta 1

x [cm]	Δx [cm]	MPV	ΔMPV
20	3	3046	24
27	3	2752	55
35	3	2575	15
45	3	2430	12
55	3	2289	11

I dati precedenti sono stati fittati con una funzione esponenziale decrescente come fatto in precedenza. Il risultato relativo al Ch 0, ovvero alla barretta 1, è illustrato nella Fig. 2.12.

Figura 2.12: Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta 1, CH00.

Risulta quindi:

$$L_{b_1} = (123.3 \pm 13.85) \text{ cm.} \quad (2.4)$$

$$L'_{CH01} = (23.73 \pm 2.52) \text{ cm.} \quad (2.5)$$

$$L'_{CH02} = (27.73 \pm 2.80) \text{ cm.} \quad (2.6)$$

Si osserva che, per la barretta 1 oggetto di test, la lunghezza di attenuazione misurata è significativamente maggiore che per le 2 barrette di riferimento.

2.5 Barretta 2

Al canale 0 del modulo di acquisizione è stata infine collegata la nuova barretta oggetto di test.

La figura 2.13 illustra i risultati ottenuti in particolare per la distanza pari a 27 cm.

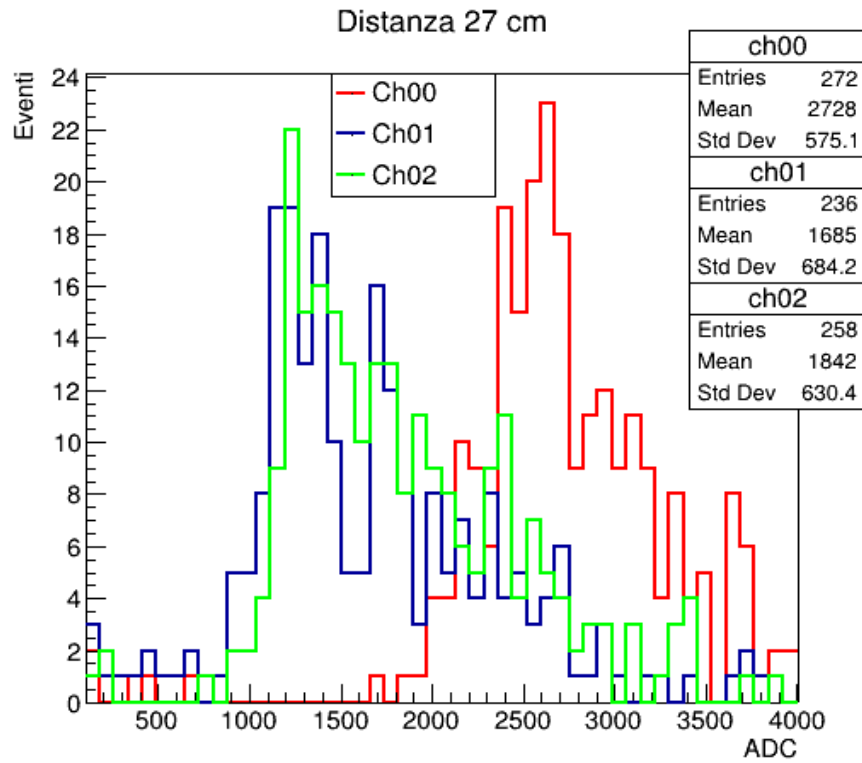


Figura 2.13: Dati acquisiti sui 3 canali per il test della barretta 2, in corrispondenza di una distanza di 27 cm dall'estremo in cui è situato il SiPM.

Anche in questo caso gli istogrammi, pur riferendosi ad una singola distanza, suggeriscono che la barretta collegata al canale 0 oggetto di test possa presentare una lunghezza di attenuazione maggiore rispetto a quelle collegate al canale 1 e 2. Nella Tabella 2.5 sono riportati i valori ottenuti dai fit del segnale di ADC con una funzione di Landau, per ognuna delle distanze considerate, nel caso del test della barretta 2.

Tabella 2.5: CH00 - barretta 2

x [cm]	Δx [cm]	MPV	ΔMPV
20	3	2740	28
27	3	2564	37
35	3	2226	16
45	3	2017	18
55	3	1876	13

I dati precedenti vengono fittati con una funzione esponenziale decrescente come fatto per le precedenti misure. Il risultato relativo al Ch 0, ovvero alla barretta 2, è riportato in Fig. 2.14.

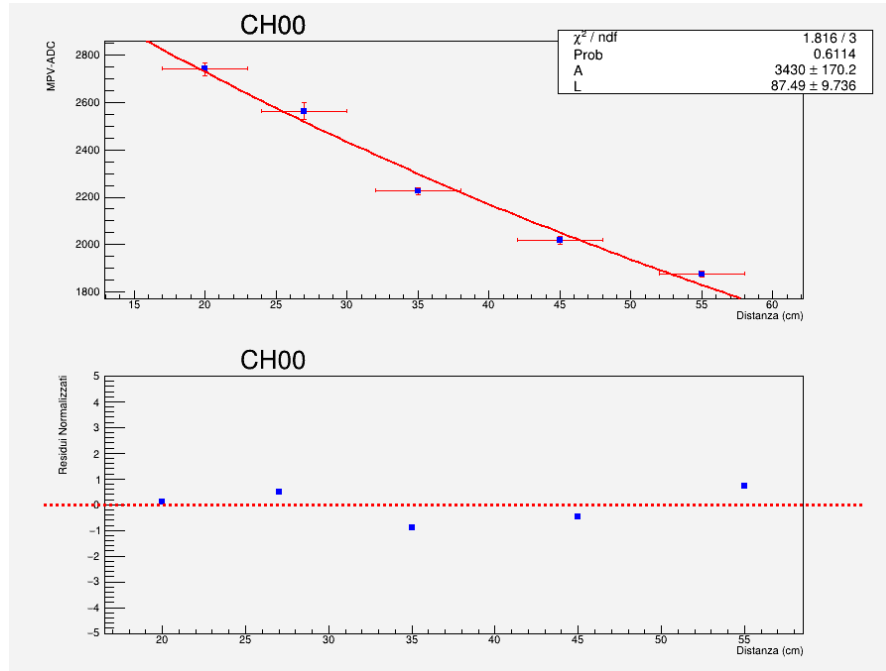


Figura 2.14: Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta 2, CH00.

Dai fit effettuati sui dati raccolti attraverso i canali 0, 1 e 2 otteniamo:

$$L_{b_2} = (87.49 \pm 9.74) \text{ cm} \quad (2.7)$$

$$L''_{CH01} = (24.15 \pm 2.51) \text{ cm} \quad (2.8)$$

$$L''_{CH02} = (28.58 \pm 2.94) \text{ cm} \quad (2.9)$$

Avendo a disposizione più misure indipendenti, come lunghezza di attenuazione delle barrette di riferimento 1 e 2 si può considerare la media delle lunghezze di attenuazione delle stesse, ottenute dai fit delle diverse misure.

$$L_{CH01}^{def} = (23.49 \pm 1.46) \text{ cm} \quad (2.10)$$

$$L_{CH02}^{def} = (27.20 \pm 1.64) \text{ cm} \quad (2.11)$$

Anche per la barretta 2, la misura della lunghezza di attenuazione fornisce dunque un valore significativamente maggiore che per le 2 barrette di riferimento.

2.6 Misure di efficienza

In questa sezione si trattano le misure di efficienza delle barrette di test. In particolare sono state determinate due tipologie di efficienza: l'efficienza di acquisizione e l'efficienza intrinseca delle barrette oggetto di test. Più precisamente, le inefficienze possono essere determinate da vari fattori:

1. Inefficienza da tempo morto di acquisizione

Il trigger esterno sopraggiunge mentre la scheda di acquisizione è "busy", ovvero impegnata nella conversione dei segnali da analogici a digitali di un self-trigger generato in precedenza. In questi casi si dice che la scheda di acquisizione è in "tempo morto".

2. Inefficienza intrinseca della barretta

Il segnale di luce emessa è troppo debole oppure la raccolta di luce da parte del SiPM è insufficiente per produrre un segnale sopra la soglia di discriminazione scelta. Ad esempio: nel primo caso potrebbe trattarsi di difetti all'interno del materiale che costituisce la barretta, nel secondo il problema potrebbe essere causato da un accoppiamento non perfetto tra il SiPM e la barretta.

3. Inefficienza di allineamento

Un allineamento geometrico non ottimale tra barretta e finger che forniscono il trigger esterno a causa del quale la particella attraversa i finger ma non una o più barrette.

4. Inefficienza da eventi simultanei indipendenti

Se le due coppie di finger vengono interessate da eventi indipendenti in un intervallo che fa scattare il trigger esterno le barrette non daranno un segnale e l'evento non sarà acquisito. Questo tipo di inefficienza si può ritenere trascurabile.

In particolare, con efficienza di acquisizione si intende il rapporto tra il numero di eventi acquisiti dal sistema ed il numero di trigger esterni. Ovviamente questo tipo di efficienza è comune a tutte e tre le barrette collegate contemporaneamente ai canali 0, 1 e 2, in quanto dipende essenzialmente dalle capacità della scheda di acquisizione. Indichiamo con N_{DAQ} il numero di conteggi acquisiti dal sistema di acquisizione e con N_{trig} il conteggio degli eventi di trigger. Durante l'acquisizione dati per ciascuna barretta oggetto di test, sia N_{trig} che N_{DAQ} sono stati rilevati per ogni distanza x tra il punto di passaggio dei muoni e l'estremità della barretta in cui è situato il SiPM. Per l'efficienza di acquisizione è stata quindi considerata la media delle efficienze determinate per ciascuna distanza, pesata con il rispettivo numero di eventi di trigger.

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_i \cdot N_{trig,i})}{\sum_{i=1}^n N_{trig,i}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\frac{N_{DAQ,i}}{N_{trig,i}} \cdot N_{trig,i})}{\sum_{i=1}^n N_{trig,i}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{DAQ,i}}{\sum_{i=1}^n N_{trig,i}} = \frac{N_{DAQ}^{tot}}{N_{trig}^{tot}} \quad (2.12)$$

L'incertezza di tipo statistico associata è data dalla relazione seguente.

$$\Delta\epsilon = \frac{\sqrt{N_{DAQ}^{tot}}}{N_{trig}^{tot}} \quad (2.13)$$

Nella seguente tabella sono riportati i valori di efficienza di acquisizione, ottenuti per le tre barrette oggetto di test.

Tabella 2.6: Efficienza di acquisizione per le diverse misure

	ϵ	$\Delta\epsilon$
Barretta prototipo	0.97	0.01
Barretta 1	0.95	0.01
Barretta 2	0.96	0.02

Negli istogrammi che seguono, sono rappresentate le distribuzioni di ADC fino al valore 500 per la barretta prototipo alle varie distanze. È chiaramente visibile il piedistallo rappresentato dal picco situato tra i valori di ADC 50 e 60.

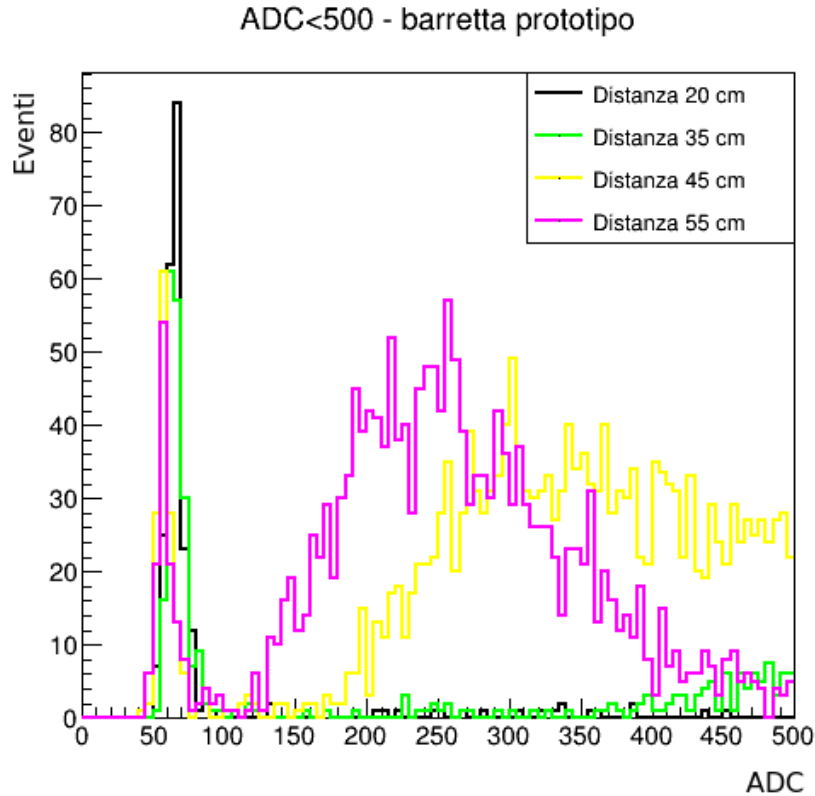


Figura 2.15: Dati acquisiti per la barretta prototipo nell'intervallo $ADC < 500$ per le varie distanze dal SiPM.

Affinché sia garantita una netta separazione tra fondo e segnale, è ragionevole dunque considerare il valore $ADC = 150$ come soglia minima per i segnali fisici. Adoperando l'applicativo ROOT è stato determinato il numero di eventi in cui almeno una delle due barrette collegate ai canali 1 e 2 del sistema di acquisizione ha fornito un valore di ADC maggiore di 150, ovvero l'OR logico dei segnali delle barrette di riferimento 1 e 2. Pertanto tale numero di eventi viene denominato " N_{OR} ". In questo campione è stato poi determinato il numero di eventi in cui anche la barretta oggetto di test ha fornito contemporaneamente un segnale ($ADC > 150$), ovvero l'AND logico tra la barretta oggetto di test

e l'OR delle barrette di riferimento. Questo numero sarà indicato con " N_{cut} ". Chiamiamo "efficienza intrinseca" della barretta oggetto di test il rapporto tra N_{cut} e N_{OR} e la indichiamo con Σ :

$$\Sigma = \frac{N_{cut}}{N_{OR}} \quad (2.14)$$

Per ogni distanza dal SiPM sono stati quindi determinati N_{OR} e N_{cut} ed è stata calcolata l'efficienza intrinseca con l'incertezza statistica associata, quest'ultima ottenuta con la propagazione degli errori e data dalla relazione:

$$\Delta\Sigma = \frac{\sqrt{N_{cut}}}{N_{OR}}. \quad (2.15)$$

Nelle tabelle seguenti sono riportati i risultati ottenuti.

Tabella 2.7: Efficienza intrinseca - Barretta prototipo

x [cm]	N_{cut}	N_{OR}	Σ	$\Delta\Sigma$
20	3127	3302	0.95	0.02
35	2730	2863	0.95	0.02
45	2557	2715	0.94	0.02
55	1790	1992	0.90	0.02

Tabella 2.8: Efficienza intrinseca - Barretta 1

x [cm]	N_{cut}	N_{OR}	Σ	$\Delta\Sigma$
20	1872	1974	0.95	0.02
27	238	248	0.96	0.06
35	1154	1204	0.96	0.03
45	1429	1499	0.95	0.02
55	1639	1715	0.96	0.02

Tabella 2.9: Efficienza intrinseca - Barretta 2

x [cm]	N_{cut}	N_{OR}	Σ	$\Delta\Sigma$
20	606	635	0.95	0.04
27	267	282	0.95	0.06
35	1026	1080	0.95	0.03
45	603	635	0.95	0.04
55	769	801	0.96	0.03

Si osservi che la barretta prototipo presenta un'efficienza intrinseca minore per la distanza di 55 cm, evidentemente a causa della ridotta lunghezza di attenuazione dovuta probabilmente alle caratteristiche proprie del materiale o alla lavorazione della barretta stessa.

In conclusione, le misure effettuate hanno permesso di valutare in primo luogo l'inefficienza di acquisizione dati, da attribuirsi principalmente al tempo morto di acquisizione e solo marginalmente ad inefficienze di allineamento e da eventi multipli simultanei. L'analisi dei dati acquisiti ha poi permesso di valutare l'efficienza intrinseca delle singole barrette, riconducibile alle loro caratteristiche specifiche ed all'allineamento.

2.7 Confronto dei wrapping

Per individuare la tipologia di wrapping più performante da adoperare nella realizzazione del CRT è stata effettuata una misura comparativa su una terza barretta fornita dalla ditta. Tale barretta nel seguito sarà indicata come "barretta W", dove con W si intende che è stata utilizzata per lo studio dei wrapping. Le misure sulla barretta W, sempre collegata al canale 0 del setup sperimentale descritto precedentemente, sono state effettuate in tre condizioni diverse:

1. senza alcun wrapping (la barretta è stata posta semplicemente nella box di schermatura dalla luce esterna);
2. barretta avvolta in un foglio di mylar;
3. barretta avvolta in uno strato di teflon.

In tutti e tre i casi è stata determinata la lunghezza di attenuazione con le modalità già descritte nelle sezioni precedenti.

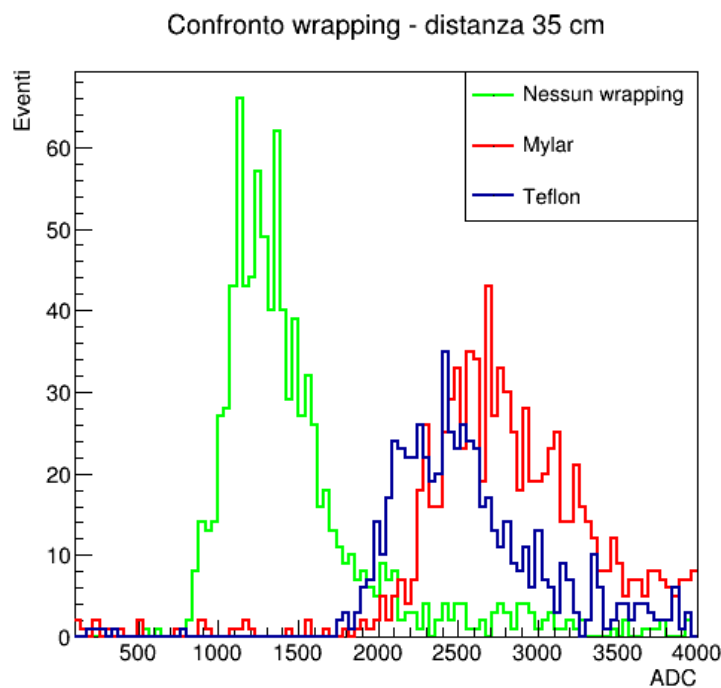


Figura 2.16: Dati acquisiti in diverse condizioni di wrapping ad una distanza di 35 cm dall'estremo della barretta in cui è situato il SiPM.

La fig. 2.16 mostra il confronto dell'ampiezza del segnale in termini di valore di ADC nelle 3 situazioni descritte, alla distanza di 35 cm tra il punto di attraversamento dei muoni e l'estremità della barretta accoppiata al SiPM. È evidente che in assenza di wrapping l'ampiezza del segnale acquisito è significativamente

inferiore rispetto alle situazioni in cui la barretta è avvolta in un materiale riflettente. Inoltre si evince una sostanziale compatibilità tra le ampiezze di segnale con wrapping in teflon e quelle relative al wrapping in mylar. In particolare, nel caso di avvolgimento con mylar, si nota uno spostamento della distribuzione verso valori di ADC leggermente superiori rispetto al teflon.

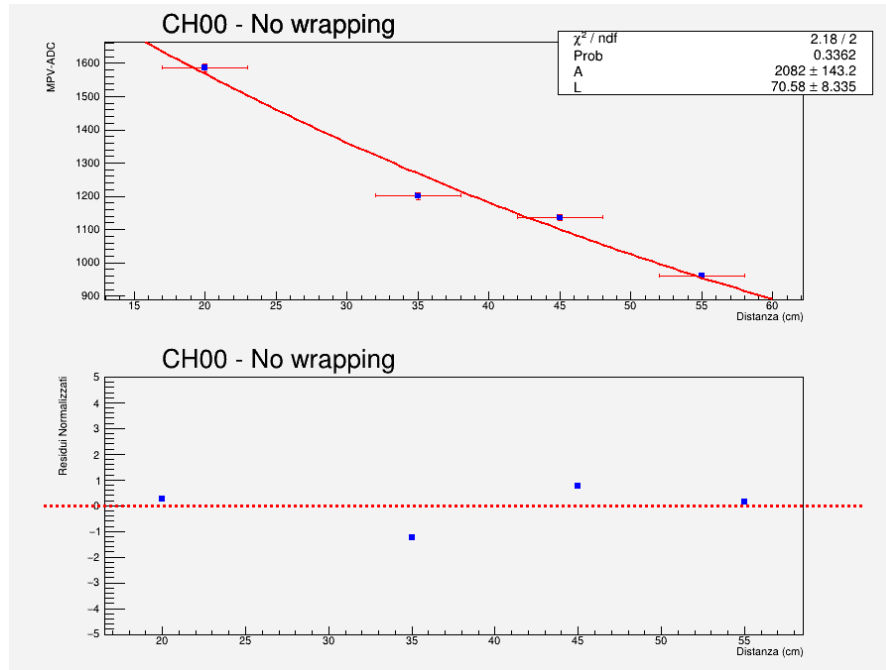
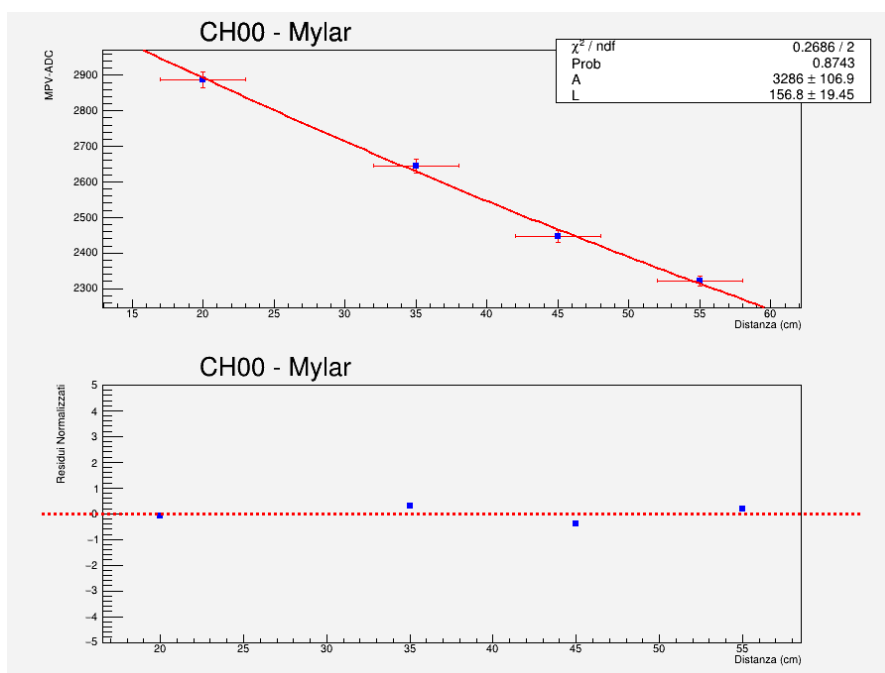
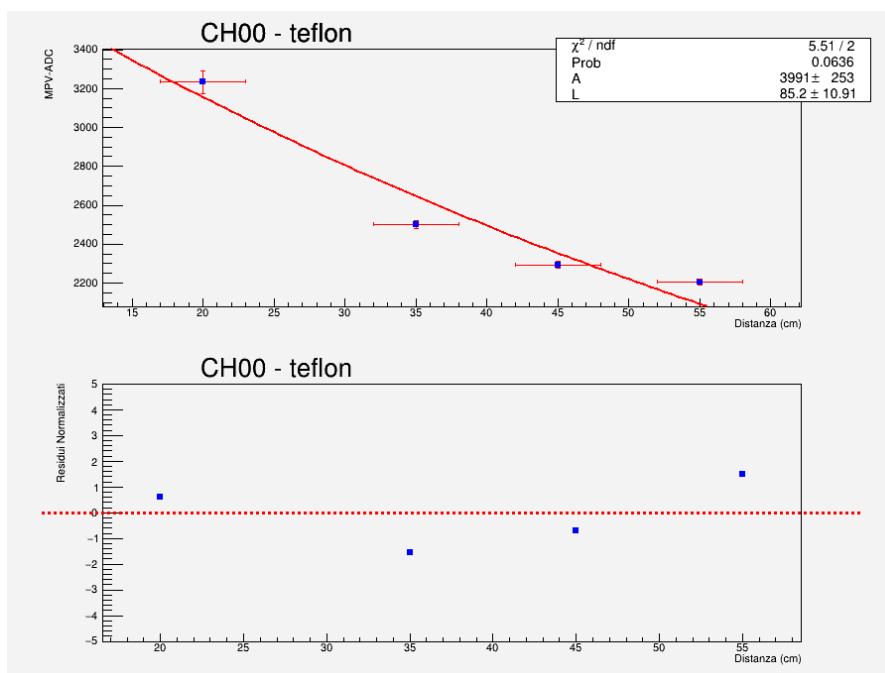


Figura 2.17: Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta W in assenza di wrapping.

Figura 2.18: Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta W con wrapping in mylar.Figura 2.19: Fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta W con wrapping in teflon.

Per la lunghezza di attenuazione della barretta W nelle tre differenti condizioni di wrapping, come mostrato nelle figure 2.17, 2.18 e 2.19, si ottengono i seguenti valori:

$$L_{NoWrap} = (70.58 \pm 8.34) \text{ cm} \quad (2.16)$$

$$L_{Mylar} = (156.8 \pm 19.5) \text{ cm} \quad (2.17)$$

$$L_{Teflon} = (85.2 \pm 10.9) \text{ cm} \quad (2.18)$$

La barretta risulta avere una lunghezza di attenuazione significativamente superiore con wrapping in mylar rispetto alle situazioni 1) e 3). Tuttavia la robustezza dei segnali osservati anche alla massima distanza lungo le barrette (come mostrato in Fig. 2.20) rende entrambi i materiali (mylar e teflon) perfettamente idonei per il wrapping da utilizzare nel CRT.

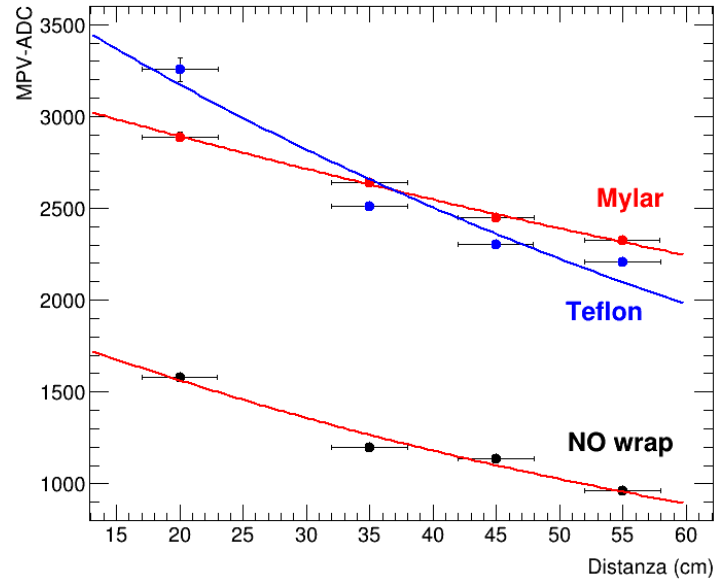


Figura 2.20: Confronto dei fit di MPV_{ADC} vs x [cm] per la barretta W nelle tre condizioni di wrapping prese in esame.

Da tutti i test effettuati e descritti nella presente tesi, si nota una certa variabilità della lunghezza di attenuazione su barrette identiche, a parità di materiale usato per il wrapping. Verosimilmente, ciò può essere dovuto a differenze inevitabili nelle modalità manuali di avvolgimento.

Capitolo 3

Conclusioni

I risultati ottenuti mettono in evidenza una sostanziale differenza tra la barretta prototipale e le due barrette fornite dall'azienda. La barretta prototipo ha mostrato una lunghezza di attenuazione di (16.62 ± 1.96) cm su una lunghezza complessiva della barretta di 70 cm. Questo implica una considerevole perdita di intensità della luce generata dal passaggio di una particella all'interno della barretta. Inoltre l'efficienza intrinseca della barretta risulta inferiore intorno alla distanza di 55 cm dall'estremo in cui è situato il SiPM a causa della ridotta lunghezza di attenuazione. La barretta 1 e la barretta 2 hanno dimostrato una qualità superiore. La barretta 1 ha una lunghezza di attenuazione di (123.3 ± 13.85) cm, pertanto la perdita di fotoni all'interno è trascurabile per le nostre esigenze. L'efficienza rimane stabile in funzione della distanza dal SiPM tra 0.95 e 0.96. La barretta 2 ha anch'essa una perdita di fotoni trascurabile con una lunghezza di attenuazione di (87.49 ± 9.74) cm. L'efficienza intrinseca in funzione della distanza dal SiPM è tra 0.95 e 0.96. L'efficienza di acquisizione per i tre test è soddisfacente, rendendo il set up sperimentale idoneo alla qualifica-

zione delle barrette. I dati raccolti confermano che entrambe le barrette fornite dall'azienda soddisfano i requisiti di alta efficienza e uniformità per garantire la corretta ricostruzione delle tracce nel CRT e possono essere adoperate nella sua realizzazione.

Dallo studio dei wrapping si evince che i due materiali studiati hanno prestazioni paragonabili in termini di ampiezza dei segnali. La differenza più significativa emerge nello studio della propagazione della luce all'interno della barretta W. Il wrapping in mylar ha determinato una lunghezza di attenuazione significativamente superiore, pari a $(156.8 \pm 19.5) \text{ cm}$, rispetto al wrapping in teflon, $(85.2 \pm 10.9) \text{ cm}$. Entrambi i wrapping studiati risultano essere idonei ad essere adoperati nel CRT.

Bibliografia

- [1] William R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer-Verlag, 2nd edition, 1994. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-57920-2>.
- [2] B.Abi *et al.* (DUNE collaboration). The dune far detector interim design report volume 1: Physics, technology and strategies, 2018. <https://arxiv.org/abs/1807.10334>.
- [3] A. Abed Abud *et al.* (DUNE collaboration). Deep underground neutrino experiment (dune) near detector conceptual design report, 2021. <https://arxiv.org/abs/2103.13910>.
- [4] Nicolò Tosi. The sand detector of the dune experiment. *Nucl. Inst. and Meth. A*, 1080:170727, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170727>.
- [5] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurements*. John Wiley & Sons, 4th edition, 2010.
- [6] https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array/S14160-6050HS.html.
- [7] <https://caen.it/products/5202>.